

-1AP20 Rec'd PCT/PTO 06 JUL 2006

Dispositif de sous-échantillonnage temporel d'un signal optique de type OTDM, convertisseur OTDM-WDM comportant un tel dispositif et convertisseur WDM-OTDM

La présente invention concerne un dispositif de sous-échantillonnage temporel d'un signal optique de type OTDM, un convertisseur de signal OTDM-WDM comportant un tel dispositif et un convertisseur WDM-OTDM

Un signal de type OTDM (de l'Anglais « Optical Time-Division Multiplexed ») s'entend d'un signal optique résultant d'un multiplexage temporel de signaux optiques d'origine.

Un signal de type WDM (de l'Anglais « Wavelength-Division Multiplexed ») s'entend d'un signal optique résultant d'un multiplexage en longueur d'onde de signaux optiques d'origine.

Plus précisément, l'invention concerne un dispositif de sous-échantillonnage temporel d'un signal optique de type OTDM à une fréquence de sous-échantillonnage prédéterminée, du type comportant :

- un générateur d'impulsions d'horloge émises à la fréquence de sous-échantillonnage prédéterminée et à une longueur d'onde de conversion ; et
- un dispositif de conversion de longueur d'onde recevant en entrée le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge pour fournir en sortie un signal sous-échantillonné du signal optique à la longueur d'onde de conversion.

Un tel dispositif de sous-échantillonnage est décrit dans le document intitulé "Simultaneous All-Optical Demultiplexing of a 40-Gb/s Signal to 4 x 10 Gb/s WDM Channels Using an Ultrafast Fiber Wavelength Converter", de L. Rau et al. , publié dans IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, volume 14, n°12, de Décembre 2002. Ce document décrit un dispositif de sous-échantillonnage temporel comportant un dispositif de conversion de longueur d'onde constitué d'un modulateur de phases croisées associé à un filtre WDM, tel qu'un routeur de guide d'onde en réseau (de l'anglais « arrayed waveguide router »). Ce dispositif de sous-échantillonnage temporel est en général difficile à mettre en œuvre et peu robuste face aux perturbations environnementales, telles que modifications de température, vibrations, etc.

L'invention concerne également un convertisseur d'un signal optique de type WDM en un signal optique de type OTDM, le signal optique de type WDM étant constitué de plusieurs signaux optiques multiplexés, chacun étant transmis à une longueur d'onde qui lui est propre, le convertisseur comportant un générateur de signal continu émis à une

-2-

longueur d'onde de conversion prédéterminée et au moins un dispositif de conversion de longueur d'onde recevant en entrée le signal continu et les signaux optiques multiplexés en longueur d'onde, pour fournir en sortie un signal optique de type OTDM émis à une fréquence temporelle multiple de la fréquence commune des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde.

Un tel convertisseur est décrit dans le document intitulé "WDM to OTDM Multiplexing Using an Ultrafast All-Optical Wavelength Converter", de B-E. Olsson et al. , publié dans IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, volume 13, n°9, de Septembre 2001. Ce document décrit un convertisseur WDM-OTDM comportant un dispositif de conversion de longueur d'onde constitué d'un modulateur de phases croisées associé à un filtre, tel qu'une fibre de Bragg. Ce convertisseur est également difficile à mettre en œuvre et peu robuste face aux perturbations environnementales, telles que modifications de température, vibrations, etc.

Le dispositif de sous-échantillonnage temporel et le convertisseur précités ne sont en outre pas adaptés pour des signaux de type OTDM transmis à des fréquences de l'ordre de 160 GHz ou plus.

L'invention vise à remédier à ces inconvénients en fournissant un dispositif de sous-échantillonnage temporel, un convertisseur OTDM-WDM et un convertisseur WDM-OTDM simples et fiables, capables de fonctionner pour des signaux OTDM de 160 GHz ou plus.

L'invention a donc pour objet un dispositif de sous-échantillonnage temporel d'un signal optique de type OTDM à une fréquence de sous-échantillonnage prédéterminée, du type précité, caractérisé en ce que le dispositif de conversion comporte un amplificateur optique linéaire disposé de manière à recevoir le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge en sens inverse de propagation, la puissance linéaire maximale de l'amplificateur étant réglée de manière à pouvoir être inférieure à la puissance de crête du signal optique de type OTDM, et un convertisseur de modulation de phase en modulation d'amplitude.

Un dispositif de sous-échantillonnage temporel selon l'invention peut en outre comporter l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- le convertisseur de modulation de phase en modulation d'amplitude comporte un interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé ;
- le dispositif comporte un circulateur disposé entre l'amplificateur et le convertisseur de modulation, de telle sorte qu'il dirige le signal optique OTDM vers l'amplificateur et le signal sortant de l'amplificateur vers le convertisseur de modulation.

-3-

L'invention a également pour objet un convertisseur d'un signal optique de type OTDM en un signal optique de type WDM, caractérisé en ce qu'il comporte une pluralité de dispositifs de sous-échantillonnage temporel tels que décrits précédemment montés en parallèle, chaque dispositif de sous-échantillonnage temporel comportant un
5 générateur d'impulsions d'horloge émises à une fréquence de sous-échantillonnage prédéterminée et à une longueur d'onde de conversion propre au dispositif de sous-échantillonnage, et un dispositif de conversion de longueur d'onde recevant en entrée le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge à la longueur d'onde de conversion propre au dispositif de sous-échantillonnage.

10 Enfin, l'invention a également pour objet un convertisseur d'un signal optique de type WDM en un signal optique de type OTDM, du type précité, caractérisé en ce que le dispositif de conversion comporte d'une part un amplificateur optique linéaire disposé de manière à recevoir le signal optique continu et les signaux optiques multiplexés en longueur d'onde en sens inverse de propagation, la puissance linéaire maximale de
15 l'amplificateur étant réglée de manière à pouvoir être inférieure à la puissance de crête des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde, et d'autre part un convertisseur de modulation de phase en modulation d'amplitude.

Un convertisseur WDM-OTDM selon l'invention peut en outre comporter l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- 20 - Il comporte des moyens de décalage temporel des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde les uns par rapport aux autres, et un unique dispositif de conversion recevant en entrée les signaux optiques multiplexés en longueur d'onde décalés temporellement ;
- 25 - Il comporte plusieurs dispositifs de conversion disposés en parallèle, chaque dispositif de conversion recevant en entrée l'un des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde et étant associé à un dispositif de décalage temporel spécifique ;
- le convertisseur de modulation de phase en modulation d'amplitude comporte un interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé ;
- 30 - il comporte au moins un circulateur disposé entre chaque amplificateur et chaque convertisseur de modulation, de telle sorte qu'il dirige les signaux optiques multiplexés en longueur d'onde vers l'amplificateur et le signal sortant de l'amplificateur vers le convertisseur de signal modulé.

Le couplage d'un amplificateur optique linéaire avec un convertisseur de modulation
35 de phase en modulation d'amplitude, par exemple un interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé, permet de réaliser une conversion de longueur d'onde en utilisant le

-4-

principe de Kramers-Krönig. Selon ce principe, une modification de la densité des porteurs de charge dans l'amplificateur optique linéaire, qui a lieu lorsque cet amplificateur fonctionne dans sa partie non linéaire, entraîne un changement de l'indice de réfraction du milieu propagatif. Ainsi, lorsque la puissance de crête du signal à
5 convertir est supérieure à la puissance linéaire maximale de l'amplificateur, c'est à dire lorsque le signal à convertir porte l'information binaire "1", le signal de conversion qui se propage en sens inverse dans l'amplificateur est déphasé. En revanche, lorsque la puissance de crête du signal à convertir est inférieure à la puissance linéaire maximale de l'amplificateur, c'est à dire lorsque le signal à convertir porte l'information binaire "0", le
10 signal de conversion qui se propage en sens inverse dans l'amplificateur n'est pas déphasé. Le signal de conversion porte alors, en modulation de phase, l'information portée par le signal à convertir. Il traverse ensuite le convertisseur de modulation, pour porter l'information en modulation d'amplitude, comme le signal à convertir.

On a réalisé de la sorte une conversion de longueur d'onde simple qui permet de
15 concevoir un dispositif de sous-échantillonnage optique, un convertisseur OTDM-WDM, et un convertisseur WDM-OTDM, entièrement optiques, simples et fonctionnant avec des signaux OTDM transitant à une fréquence au moins égale à 160 GHz.

L'invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- 20 - la figure 1 représente schématiquement la structure d'un dispositif de sous-échantillonnage selon l'invention ;
- la figure 2 représente schématiquement la structure d'un convertisseur OTDM-WDM selon l'invention ;
- la figure 3 représente schématiquement la structure d'un convertisseur
25 WDM-OTDM selon un premier mode de réalisation de l'invention ; et
- la figure 4 représente schématiquement la structure d'un convertisseur WDM-OTDM selon un second mode de réalisation de l'invention.

Le dispositif de sous-échantillonnage temporel représenté sur la figure 1 comporte un générateur 10 d'impulsions d'horloge émises à une fréquence de sous-échantillonnage
30 prédéterminée, par exemple 40 Gb/s. De la sorte, les impulsions d'horloge émises sont espacées les unes des autres de 25 picosecondes. La longueur d'onde de ce train d'impulsions, appelée longueur d'onde de conversion, est également prédéterminée et prend par exemple une valeur $\lambda_H = 1\,544,5\text{ nm}$.

Le dispositif comporte en outre un récepteur 12 de signal optique de type OTDM,
35 c'est-à-dire résultant d'un multiplexage temporel de signaux optiques. Par exemple, ce

-5-

signal optique est transmis à une fréquence de 160 GHz, c'est-à-dire que les impulsions sont espacées les unes des autres de 6,25 picosecondes.

Ce signal optique est par exemple transmis à une longueur d'onde $\lambda_s = 1555,5$ nm.

5 Ce signal optique de type OTDM est destiné à être sous-échantillonné et converti à la longueur d'onde de conversion du train d'impulsions émis par le générateur 10, pour fournir, en sortie du dispositif de sous-échantillonnage temporel, l'un des signaux multiplexés dans le signal optique OTDM. Pour cela, le dispositif de sous-échantillonnage comporte une interface de connexion 14 fournissant ce signal de sortie.

10 Enfin, le dispositif de sous-échantillonnage comporte un dispositif 16 de conversion de longueur d'onde recevant en entrée le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge fournies par le générateur 10.

Le dispositif de conversion comporte un amplificateur optique linéaire 18 disposé de manière à recevoir le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge en sens inverse de propagation.

15 A cet effet, une première borne de l'amplificateur optique linéaire 18 est directement raccordée à la sortie du générateur 10 d'impulsions d'horloge, alors qu'une seconde borne de cet amplificateur optique linéaire est raccordé à un circulateur 22 disposé entre le récepteur 12 et l'amplificateur 18, de manière à diriger le signal optique de type OTDM vers cette seconde borne.

20 La puissance linéaire maximale de l'amplificateur optique linéaire 18 est réglée de manière à pouvoir être inférieure à la puissance de crête du signal optique de type OTDM.

Enfin, le dispositif de conversion de longueur d'onde 16 comporte un convertisseur 20 de modulation de phase en modulation d'amplitude. De préférence, le convertisseur de modulation de phase en modulation d'amplitude est un interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé.

25 Le circulateur 22 est disposé entre l'amplificateur optique linéaire 18 et ce convertisseur de modulation, de manière à diriger les signaux sortant de la seconde borne de l'amplificateur optique linéaire vers ce convertisseur de modulation.

Le dispositif décrit précédemment fonctionne de la façon suivante :

- 30 - lorsque la puissance de crête du signal optique de type OTDM est supérieure à la puissance linéaire maximale de l'amplificateur 18, c'est-à-dire lorsque le signal de type OTDM porte l'information binaire « 1 », et lorsque cette information binaire correspond à une impulsion d'horloge qui se propage en sens inverse dans l'amplificateur, celle-ci est déphasée (de préférence d'une valeur π) ;
- 35

-6-

- lorsque la puissance de crête du signal de type OTDM est inférieure à la puissance linéaire maximale de l'amplificateur 18, c'est-à-dire lorsque le signal de type OTDM porte l'information binaire « 0 », et lorsque cette information binaire correspond à une impulsion qui se propage en sens inverse dans l'amplificateur 18, celle-ci n'est pas déphasée ;
- le train d'impulsions traverse ensuite l'interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé pour convertir la modulation de phase en modulation d'amplitude du signal sortant du dispositif de sous-échantillonnage temporel.

Le signal temporel obtenu en sortie est un signal sous-échantillonné au quart de la fréquence temporelle du signal de type OTDM, moyennant une conversion de longueur d'onde, de λ_o à λ_H .

Le dispositif de sous-échantillonnage temporel décrit précédemment peut être utilisé pour réaliser un convertisseur OTDM-WDM, comme cela est représenté sur le montage de la figure 2.

Sur ce montage, plusieurs dispositifs de conversion de longueur d'onde 16₁, 16₂, 16₃, 16₄ identiques au dispositif 16 sont disposés en parallèle et sont tous reliés au récepteur 12.

Chaque dispositif de conversion 16_i reçoit en outre sur la première borne de son amplificateur optique linéaire 18_i, le signal fourni par un générateur 10_i d'impulsions d'horloge émises à une fréquence égale au quart de la fréquence du signal optique de type OTDM fourni par le récepteur 12. Chaque générateur d'impulsions d'horloge 10_i est décalé d'un temps-bit correspondant à la fréquence du signal optique OTDM, par rapport au générateur d'impulsions d'horloge 10_{i-1}.

On obtient ainsi en sortie, sur quatre interfaces de connexion 14₁, 14₂, 14₃ et 14₄, quatre signaux représentant un sous-échantillonnage du signal optique de type OTDM au quart de sa fréquence. C'est-à-dire que si le signal de type OTDM résulte du multiplexage de quatre signaux temporels d'origine, ce montage permet d'obtenir en sortie les quatre signaux.

Chaque générateur d'impulsion d'horloge 10_i génère des signaux à une longueur d'ondes qui lui est propre égale à λ_{H_i} .

Par exemple, $\lambda_{H1} = 1544,5$ nm, $\lambda_{H2} = 1546,3$ nm, $\lambda_{H3} = 1548,1$ nm, $\lambda_{H4} = 1549,9$ nm. Les quatre signaux sous-échantillonnés obtenus peuvent alors être recombinaés pour obtenir un signal multiplexé de type WDM.

On a ainsi réalisé un convertisseur d'un signal optique de type OTDM en un signal optique de type WDM.

-7-

En utilisant le même principe, on peut réaliser un convertisseur WDM-OTDM, comme cela est représenté sur le montage de la figure 3, selon un premier mode de réalisation de l'invention.

Comme les montages précédents, le montage représenté sur cette figure comporte
5 un dispositif 16 de conversion de longueur d'onde comportant un amplificateur optique linéaire 18, un circulateur 22 et un interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé 20.

Dans ce montage, la première borne de l'amplificateur optique linéaire 18 est raccordée à un générateur 34 de signal continu émis à une longueur d'onde de conversion prédéterminée, par exemple $\lambda_s = 1\,555,5\text{ nm}$.

10 Le circulateur 22, disposé entre l'amplificateur optique linéaire 18 et l'interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé 20 est également relié à des moyens de fourniture d'un signal optique de type WDM, c'est-à-dire un signal optique constitué de plusieurs signaux optiques multiplexés en longueur d'onde, chacun étant transmis à une longueur d'onde qui lui est propre.

15 Les moyens de fournitures sont constitués de moyens 30₁, 30₂, 30₃ et 30₄ de réception des signaux optiques multiplexés montés en parallèle, et chacun associé à un retardateur 32₁, 32₂, 32₃ et 32₄.

Ces retardateurs permettent de décaler temporellement les signaux optiques multiplexés issus des moyens 30₁, 30₂, 30₃ et 30₄, d'un temps-bit équivalent à la
20 fréquence multiple souhaitée en sortie du signal optique de type OTDM. Dans le cas représenté, cette fréquence est égale à quatre fois la fréquence temporelle des signaux optiques multiplexés d'origine, puisque le signal WDM est constitué de quatre signaux d'origine.

En sortie du convertisseur WDM-OTDM, une interface de connexion 36 fournit un
25 signal optique de type OTDM à la fréquence temporelle multiple souhaitée et à la longueur d'onde λ_s .

Un autre mode de réalisation de ce convertisseur WDM-OTDM est représenté sur la figure 4.

Sur cette figure, on a disposé en parallèle autant de dispositifs 16₁, 16₂, 16₃ et 16₄
30 de conversion de longueur d'onde que de moyens 30₁, 30₂, 30₃, et 30₄ de fourniture des signaux optiques multiplexés en longueur d'ondes.

Dans cette configuration, les retardateurs 32₁, 32₂, 32₃ et 32₄ peuvent être disposés en sortie de chacun des dispositifs de conversion de longueur d'onde, avant que les signaux de sortie ne soient combinés entre eux pour fournir le signal de type OTDM
35 souhaité.

-8-

- Il apparaît clairement que les dispositifs décrits précédemment permettent de réaliser des sous-échantillonnages temporels, des conversions WDM-OTDM et des conversions OTDM-WDM de façon simple et en utilisant des dispositifs tout optique. L'association d'un amplificateur optique linéaire avec un interféromètre de Mach-Zehnder
- 5 différentiel retardé permet en outre de traiter des signaux à fréquences très élevées, par exemple des fréquences supérieures à 160 GHz pour le signal optique de type OTDM.

REVENDICATIONS

1. Dispositif de sous-échantillonnage temporel d'un signal optique de type OTDM à une fréquence de sous-échantillonnage prédéterminée, comportant d'une part un
5 générateur (10) d'impulsions d'horloge émises à la fréquence de sous-échantillonnage prédéterminée et à une longueur d'onde de conversion (λ_H), et d'autre part un dispositif (16) de conversion de longueur d'onde recevant en entrée le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge, pour fournir en sortie un signal sous-échantillonné du signal optique à la longueur d'onde de conversion, **caractérisé en ce que le dispositif de**
10 **conversion comporte un amplificateur optique linéaire (18) disposé de manière à recevoir le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge en sens inverse de propagation, la puissance linéaire maximale de l'amplificateur étant réglée de manière à pouvoir être inférieure à la puissance de crête du signal optique de type OTDM, et un**
15 **convertisseur (20) de modulation de phase en modulation d'amplitude.**
2. Dispositif de sous-échantillonnage temporel selon la revendication 1, dans lequel le convertisseur (20) de modulation de phase en modulation d'amplitude comporte un interféromètre de Mach-Zehnder différentiel retardé.
3. Dispositif de sous-échantillonnage temporel selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comporte un circulateur (22) disposé entre l'amplificateur (18) et le
20 convertisseur de modulation (20), de telle sorte qu'il dirige le signal optique OTDM vers l'amplificateur et le signal sortant de l'amplificateur vers le convertisseur de modulation.
4. Convertisseur d'un signal optique de type OTDM en un signal optique de type WDM, **caractérisé en ce qu'il comporte une pluralité de dispositifs de sous-échantillonnage temporel selon l'une quelconque des revendications 1 à 3 montés en**
25 **parallèle, chaque dispositif de sous-échantillonnage temporel comportant un générateur (10₁, 10₂, 10₃, 10₄) d'impulsions d'horloge émises à une fréquence de sous-échantillonnage prédéterminée et à une longueur d'onde de conversion propre au dispositif de sous-échantillonnage, et un dispositif (16₁, 16₂, 16₃, 16₄) de conversion de**
30 **longueur d'onde recevant en entrée le signal optique de type OTDM et les impulsions d'horloge à la longueur d'onde de conversion propre au dispositif de sous-échantillonnage.**
5. Convertisseur d'un signal optique de type WDM en un signal optique de type OTDM, le signal optique de type WDM étant constitué de plusieurs signaux optiques multiplexés, chacun étant transmis à une longueur d'onde qui lui est propre, le
35 convertisseur comportant un générateur (34) de signal continu émis à une longueur d'onde de conversion prédéterminée et au moins un dispositif (16₁, 16₂, 16₃, 16₄) de

-10-

conversion de longueur d'onde recevant en entrée le signal continu et les signaux optiques multiplexés en longueur d'onde, pour fournir en sortie un signal optique de type OTDM émis à une fréquence temporelle multiple de la fréquence commune des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde, **caractérisé en ce que le dispositif de**

5 conversion comporte d'une part un amplificateur optique linéaire (18 ; 18₁, 18₂, 18₃, 18₄) disposé de manière à recevoir le signal optique continu et les signaux optiques multiplexés en longueur d'onde en sens inverse de propagation, la puissance linéaire maximale de l'amplificateur étant réglée de manière à pouvoir être inférieure à la puissance de crête des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde, et d'autre part

10 un convertisseur de modulation de phase en modulation d'amplitude (20 ; 20₁, 20₂, 20₃, 20₄).

6. Convertisseur d'un signal optique de type WDM en un signal optique de type OTDM selon la revendication 5, comportant des moyens (32₁, 32₂, 32₃, 32₄) de décalage temporel des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde les uns par rapport aux autres, et un unique dispositif (16) de conversion recevant en entrée les signaux optiques

15 multiplexés en longueur d'onde décalés temporellement.

7. Convertisseur d'un signal optique de type WDM en un signal optique de type OTDM selon la revendication 5, comportant plusieurs dispositifs (16₁, 16₂, 16₃, 16₄) de conversion disposés en parallèle, chaque dispositif de conversion recevant en entrée l'un

20 des signaux optiques multiplexés en longueur d'onde et étant associé à un dispositif de décalage temporel spécifique (32₁, 32₂, 32₃, 32₄).

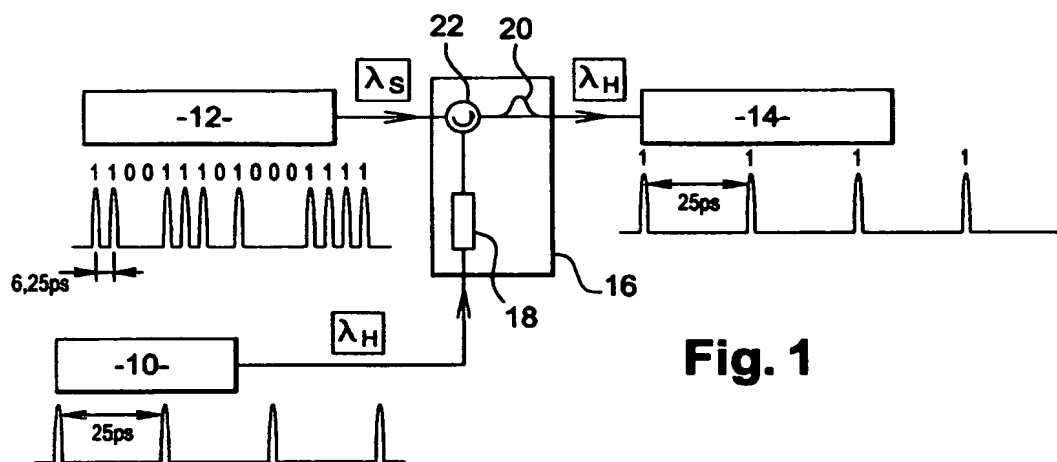
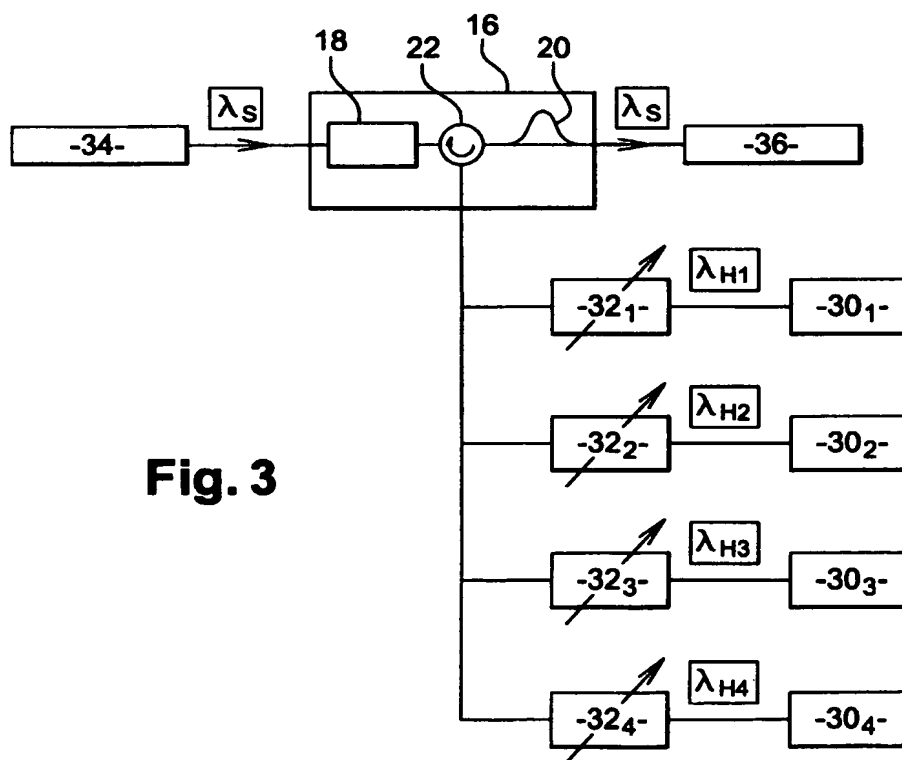
8. Convertisseur d'un signal optique de type WDM en un signal optique de type OTDM selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, dans lequel le convertisseur (20) de modulation de phase en modulation d'amplitude comporte un interféromètre de Mach-

25 Zehnder différentiel retardé.

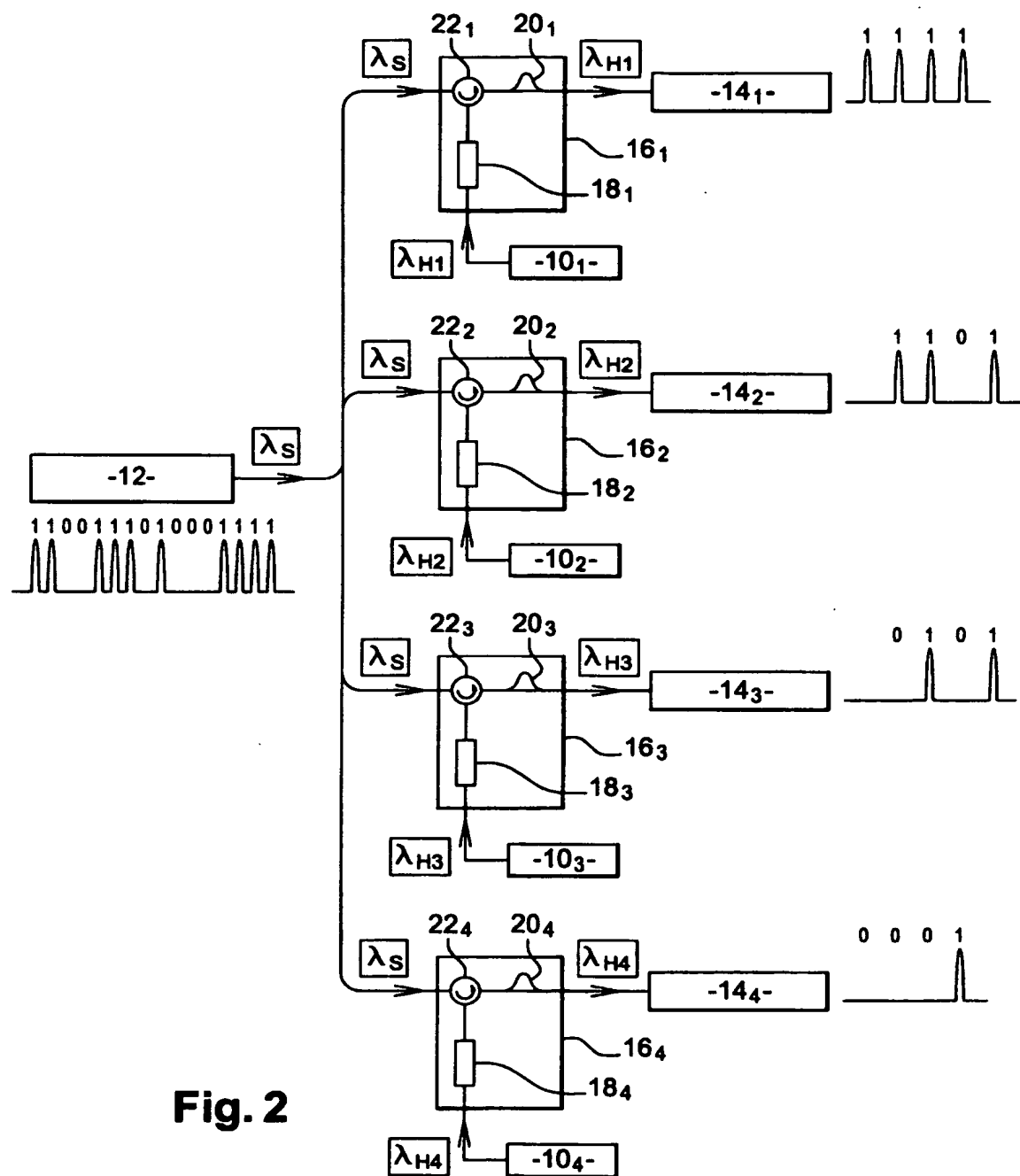
9. Convertisseur d'un signal optique de type WDM en un signal optique de type OTDM selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, comportant au moins un circulateur (22 ; 22₁, 22₂, 22₃, 22₄) disposé entre chaque amplificateur et chaque convertisseur de modulation, de telle sorte qu'il dirige les signaux optiques multiplexés en

30 longueur d'onde vers l'amplificateur et le signal sortant de l'amplificateur vers le convertisseur de signal modulé.

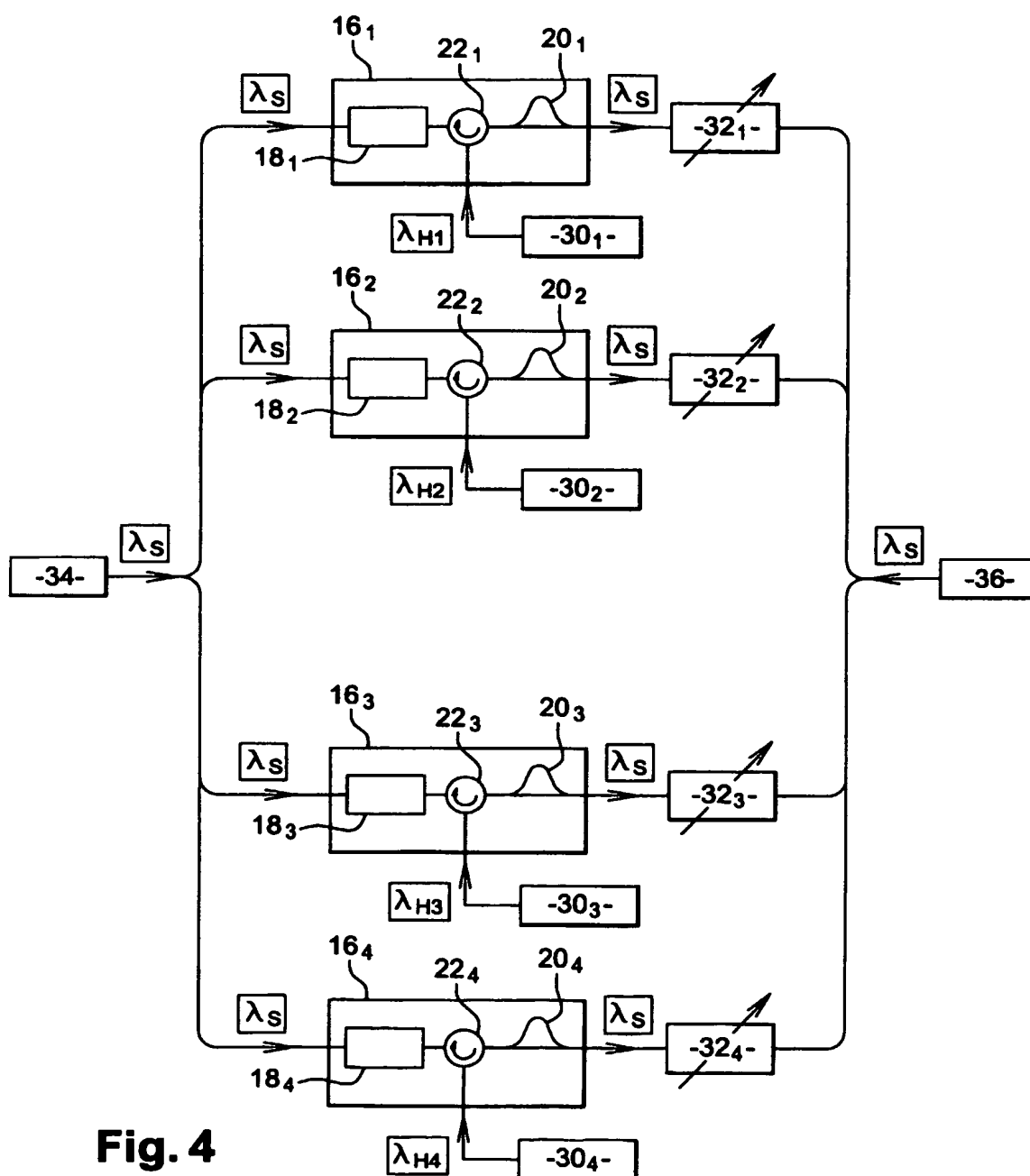
1/3

**Fig. 1****Fig. 3**

2/3



3 / 3

**Fig. 4**